

XIANDAI TONGXIN JISHU JICHU

现代

通信技术基础

赵晓华 编著

北京工业大学出版社

xiandai

现代通信技术基础

赵晓华 编著

北京工业大学出版社

内 容 简 介

本书在简单、扼要介绍通信系统基本原理的基础上,比较全面地介绍了现代通信系统的基本组成和主要技术。其中包括光纤通信、卫星通信、移动通信和数据通信的基本原理、结构组成以及关键技术和应用。本书本着通俗易懂、广泛全面的宗旨,介绍了现代通信技术的基础理论知识和实践经验。无论是通信专业还是非通信专业的学生和技术人员,通过学习本书都可以比较全面地了解通信基础理论,理解目前广泛应用的通信技术的基本原理和基本结构。

本书可作为非通信专业学生的专业扩展教材,也可作为通信专业与相关专业的技术人员、业务人员的专业学习、专业培训及其认证考试的参考材料。

图书在版编目(CIP)数据

现代通信技术基础/赵晓华编著. —北京:北京工业大学出版社, 2006.1

ISBN 7-5639-1615-6

I. 现... II. 赵... III. 通信技术 IV. TN91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 125755 号

现代通信技术基础

赵晓华 编著

*

北京工业大学出版社出版发行

邮编:100022 电话:010-67392308

各地新华书店经销

徐水宏远印刷厂印刷

*

2006年3月第1版 2006年3月第1次印刷

787 mm×1 092 mm 16开本 15印张 365千字

印数:1~3 000册

ISBN 7-5639-1615-6/T·274

定价:22.00元

前 言

随着信息社会的发展,通信技术得到迅速发展并影响着人们生活的方方面面,特别是以光纤通信、移动通信、数据通信为代表的现代通信技术的三大支柱技术更是日新月异。作为21世纪的学生和工程技术人员,要做到顺应时代潮流,适应与时俱进的科技发展,除了具备坚实的理论基础以外,还必须具有广阔的知识面,能够快速而全面地了解科学技术发展的新成果、新动态、新趋势。本教材就是为拓宽学生的知识面,使其快速了解通信技术和通信系统知识而编著的。

本教材的读者对象是通信、信息和电子类的本科高年级学生,也可以供跨学科专业的学生和工程技术人员自学以及继续教育参考使用。本教材首先介绍了通信系统原理的相关知识,包括各种调制技术、传输技术、复用技术、多址技术等各项技术的基本原理,同时,以主要通信技术为线索分别介绍其基本原理、基本结构、组网技术以及应用实例。其中包括光纤通信、卫星通信、移动通信和数据通信。各章内容相对独立,但均以第1章为基础,章节间又有一定联系。通过对本教材的学习,读者能比较全面地了解通信概念,快速而扎实地掌握通信知识。

本教材由赵晓华编著,孙亮、韩光胜老师主审。在教材编写过程中,北京工业大学电子信息和控制工程学院资深教师孙亮、易继楷提出了许多宝贵意见,王雁峰、陈浩、于建均、陈梅莲老师在本教材编写过程中给予了极大的帮助,对此,一并表示衷心的感谢。

现代通信涉及面很广,难以很全面、很详细地在一本书中全部详细介绍。且由于水平和时间有限,本教材难免有疏漏和错误之处,敬请读者予以批评指教。

编 者

目 录

第1章 通信系统基础知识	1
1.1 绪论	1
1.1.1 通信技术的发展、现状和趋势	1
1.1.2 通信系统的模型及特点	2
1.1.3 通信系统的分类	5
1.1.4 通信系统的主要性能指标	6
1.2 信息与信号	9
1.2.1 信号与信息及其度量	9
1.2.2 通信系统中的信号	10
1.3 调制与解调	14
1.3.1 调制与解调的基本概念	14
1.3.2 标准调幅与解调	16
1.3.3 其他调幅与解调方法	21
1.3.4 角度调制	26
1.3.5 模拟信号的数字传输	30
1.3.6 数字信号的基带传输	39
1.3.7 数字信号的载波传输	46
1.3.8 同步技术概念	53
1.4 信道复用技术和多址连接技术	53
1.4.1 信道复用技术	53
1.4.2 多址连接技术	59
习题	61
第2章 光纤通信系统	65
2.1 光纤通信系统概述	65
2.1.1 光波的波段划分	65
2.1.2 光纤通信的特点	65
2.1.3 光纤通信的发展与动向	66
2.1.4 光纤通信系统的基本构成	67
2.1.5 光纤通信系统的传输码型	68
2.2 光纤与光缆	69
2.2.1 光纤及其导光原理	69
2.2.2 光缆与光纤的连接	77
2.3 光端机	78

2.3.1	光发射机	78
2.3.2	光接收机	82
2.3.3	光中继器	85
2.4	光纤通信中的复用技术	86
2.4.1	光波分复用系统	86
2.4.2	光频分复用系统	87
2.4.3	副载波强度调制系统	88
2.5	外差光纤通信系统	89
2.5.1	外差光纤通信系统的组成及原理	89
2.5.2	外差光纤通信系统的优点	90
	习题	91
第3章	卫星通信系统	93
3.1	卫星通信概述	93
3.1.1	卫星通信的概念	93
3.1.2	卫星通信的特点	94
3.1.3	卫星通信系统的组成及网络形式	96
3.1.4	卫星通信的工作频段	99
3.2	通信卫星和地球站	100
3.2.1	通信卫星	100
3.2.2	地球站	103
3.3	卫星通信体制	105
3.3.1	卫星通信体制的概述	105
3.3.2	卫星通信中的多址连接技术	108
3.4	卫星通信应用	115
3.4.1	移动卫星通信系统	115
3.4.2	VSAT 卫星通信系统	118
	习题	120
第4章	移动通信系统	121
4.1	移动通信系统概述	121
4.1.1	移动通信的特征	122
4.1.2	移动通信的业务分类	123
4.1.3	移动通信的工作方式	124
4.1.4	移动通信的工作频段	125
4.1.5	移动通信系统的组成	125
4.2	移动通信的组网技术	127
4.2.1	大区制与小区制	127
4.2.2	服务区域的划分	130
4.2.3	信道配置	135
4.2.4	多信道共用技术	136

4.2.5	移动通信中的多址连接技术	137
4.2.6	信令	139
4.3	GSM 数字移动通信系统	139
4.3.1	概述	139
4.3.2	GSM 系统的组成	142
4.3.3	移动通信的编号方式	145
4.3.4	我国数字蜂窝式移动电话网络结构	146
4.3.5	GSM 系统的运行和移动管理	148
4.3.6	短消息业务 (SMS)	151
4.3.7	GPRS 简介	153
4.4	CDMA 数字蜂窝移动通信系统	155
4.4.1	CDMA 系统的特点	155
4.4.2	CDMA 系统的组成	159
4.4.3	CDMA 系统的信道组成	160
4.4.4	CDMA 系统的控制过程	162
	习题	164
第 5 章	数据通信	166
5.1	数据通信概述	166
5.1.1	基本概念	166
5.1.2	传输代码	169
5.1.3	数据传输方式	171
5.1.4	数据通信网	174
5.1.5	数据通信的应用和发展	177
5.2	通信协议	178
5.2.1	成帧	179
5.2.2	差错控制	179
5.2.3	流量控制	185
5.2.4	数据链路控制规程	186
5.2.5	其他层协议	187
5.3	数据交换技术	188
5.3.1	数据交换的必要性	188
5.3.2	数据交换方式简介	188
5.3.3	电路交换方式	189
5.3.4	报文交换方式	190
5.3.5	分组交换方式	192
5.3.6	帧方式	197
5.3.7	几种交换方式的比较	197
5.4	数据通信网	199
5.4.1	概述	199

5.4.2 分组交换网	200
5.4.3 数字数据网络 (DDN)	206
5.4.4 帧中继网 (FRN)	212
5.4.5 综合业务数据网 (ISDN)	216
5.4.6 异步传输模式 (ATM)	219
5.4.7 非对称数字用户环路 (ADSL)	224
习题	226
参考文献	228

第 1 章 通信系统基础知识

1.1 绪论

1.1.1 通信技术的发展、现状和趋势

广义地讲,无论用任何方法、通过任何传输媒介,将信息从一个地方传送到另外一个地方均可称为通信。自从有了人类活动,就产生了通信。

早在远古时代,古人利用烽火台传送警报,希腊人用火炬的位置表示字母符号,一站一站地传送信息,这种光信号的传输构成最原始的光通信系统。利用击鼓鸣金来报时和传达作战命令,这是最原始的声信号传输。后来又出现了信鸽、旗语、驿站等传送消息的方法。这些原始的通信方式,无论在距离、速度还是在可靠性和有效性方面都很差。直到 19 世纪初,人们开始利用电信号传输消息。1837 年莫尔斯发明了电报,他利用点、画、空适当组合的代码表示字母和数字,这种代码称为莫尔斯电码。1876 年贝尔发明电话,直接将声音(语言)信号转变为电信号沿导线传输。19 世纪末,人们又利用电磁波传送无线电信号,开始时传输距离只有几百米,而到了 1901 年马可尼成功地实现了横渡大西洋的无线电通信。从此,传输电信号的通信方式得到了广泛应用和迅速发展。

20 世纪,电信技术得到极大发展,特别是全球范围电话网络的形成,导致通信新技术的不断出现,即用同轴电缆代替双绞线,使系统的容量(速率和距离的乘积)大大增加。微波系统的产生与应用,使通信系统的容量进一步增加。纵观电信技术发展的全过程,可以发现一个明显的特点——频率是由低频端向高频端不断发展的。可以这样说,电信技术的发展历史是不断开拓更高频率或更短波长的历史。从长波、中波、短波、超短波发展到微波,这期间几乎每隔 6 年频率递增一个数量级。20 世纪 70 年代出现的光纤通信引发了通信技术新的革命,由于光纤极宽的带宽和极小的损耗,使通信技术的容量提高了几个数量级,成为世界上应用最广泛的通信技术。

目前主要的通信技术有光纤通信、卫星通信、移动通信和数据通信。在光纤通信和移动通信发展之前,主要以电缆通信为主。

电缆通信,是最早的通信方式,是长途通信和国际通信的主要手段,太平洋、大西洋均有大容量的越洋电缆,电缆通信采用脉冲编码调制时分多路复用。同轴电缆中的基带传输技术,使数字电话容量可达 6 400 路。

光纤通信,是以光波为载频、以光纤为传输媒介的新型通信方式,其应用规模之大、范围之广、涉及学科之多,是以往任何一种通信方式所未有的。与电缆通信相比,

每芯光纤通话路数高达百万路，中继距离达到 100 km。现在，光纤通信的新技术仍在不断涌现，诸如频分复用系统、光放大器、相干光通信、光孤子通信等，其中主要以单模长波光通信、大容量数字传输技术以及相干光通信为主流，这些技术预示着光纤通信技术的强大生命力和广阔的应用前景。它将对未来的信息社会发挥巨大的作用，产生深远的影响。

卫星通信，是一种无线电通信方式，是在地面微波通信和空间技术的基础上发展起来的，是地面微波中继通信的继承和发展，是微波中继通信的一种特殊形式。卫星通信是利用人造卫星作为中继站转发无线电波，在两个或多个地面站之间进行的通信。卫星通信覆盖区域大、通信距离远，不受地理条件限制，可以大容量传输，利用三颗同步卫星即可以实现全球通信。卫星通信具有多址连接能力，只要在卫星覆盖区域内，所有地面站都能利用此卫星进行相互间的通信。因此，卫星通信对国际通信或远程通信具有重要的意义。在国际通信中，卫星通信承担了 1/3 以上的远洋通信业务，并提供了几乎世界上所有的远洋电视信号传送，使国际间重大活动及时得以实况转播，实现全世界人与人之间短“距离”接触。卫星通信的发展趋势是向更高频段发展，采用多波束卫星和星上处理等新技术，而地面系统向小型化发展。

移动通信，是指通信双方至少有一方是在运动中进行信息交换的。近十年来，在微电子技术和计算机技术的推动下，移动通信从过去简单的无线对讲或广播方式发展成为把有线、无线融为一体，固定、移动相互连接的全国规模、全球范围的通信系统。我国从 20 世纪 90 年代中期开始发展移动通信，经历了第一代 TACS 制式模拟移动通信系统、GSM 制式第二代数字移动通信系统和 CDMA 制式第三代移动通信系统的发展历程。在今后的发展过程中，它必然朝着数字化、微型化、个人化、智能化和标准化等方面发展，随着新理论、新技术和新产品的不断涌现，移动通信将更加可靠、方便、快速、灵活，并全方位地满足人们对通信的需求。

数据通信，是计算机技术与通信科学相结合的产物，是把通信技术中的信息传输与交换和计算机数据处理、加工和存储有机结合而形成的一种通信方式。当今世界，人类已进入信息时代，信息进入了人们生活的方方面面。电视、视频点播（VOD）、电子数据互换（EDI）、文件传输、电子信箱（E-mail）、可视图文（videotex）、目录查询、智能用户电报（teletex）、遥测遥控等业务日渐普及，而这些业务有相当部分离不开数据通信。随着计算机与各种具有处理功能的智能设备在社会各个领域的广泛应用，数据通信的应用范围也日益扩大。可以说，人类社会生活的方方面面已越来越离不开数据通信了。

1.1.2 通信系统的模型及特点

1. 通信系统的模型

通信系统的一般模型如图 1-1 所示。通信的基本目的是为了在信息源和受信点之间交换信息，在图 1-1 中信息源的信息用符号 g 表示。通常 g 是一个随时间变化的信号 $g(t)$ ，它作为发信机的输入信号。一般情况下，信号 $g(t)$ 的形式不适于在传输媒质中传输，必须由发信机将它转换成适于在传输媒质中传输的信号 $s(t)$ 。在传输媒质中，信号会受到各种噪声

$N(t)$ 的干扰,因而接收机接收到的信号 $r(t)$ 可能不同于发送信号 $s(t)$ 。接收机将根据 $r(t)$ 及媒质的特性来估计 $s(t)$ 的性质,从而把 $s(t)$ 转换为输出信号 $g'(t)$ 。转换后的信号 $g'(t)$ 是 $g(t)$ 的近似或估计值。这个模型适用于任何通信系统。以上对通信模型的简单叙述回避了大量的复杂性技术问题,现举例说明实际的通信系统是怎样对应于这个模型的。以电话为例,信息源是打电话的人,信号 $g(t)$ 是人的语音。发信机,就是电话送(受)话器的话筒,它把语音转换成相应的电信号 $s(t)$,并进行发送。这时的传输媒质是电话电缆。作为接收机的是送(受)话器的扬声器,它所进行的变换,是发信机的反变换,把近似 $s(t)$ 的信号 $r(t)$ 变换成语音。电话系统中的噪声通常会引起话音失真和背景噪声。

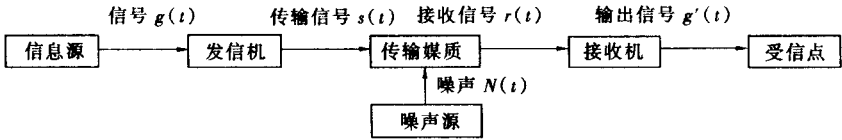


图 1-1 通信系统模型

另一个例子是电报,在发电报时,信息源发出自 A~Z 的 26 个字母和一个空格符,以及电报字符集中的其他字符组成的字符序列,例如 COME QUICKLY MOTHER SINKING。

这时,发信方的操作员把字母编制成适当的由点和画组成的莫尔斯(morse)码序列,并通过电缆把莫尔斯码序列变换为相应的电信号,再在电报线路(媒质)上进行传输,接收方的另一个操作员认识点和画组成的莫尔斯码,对它们进行解码,还原成相应的字符序列,并由此导出信息。在电报系统中的噪声主要是电噪声,噪声的突发可能使莫尔斯码中的一个点变成一个画,从而引起误码。这些误码被解码以后形成的不是原来的字符,甚至可能是字符集以外的无效字符。

图 1-1 所示通信系统模型是对各种通信系统的概括,它反映了通信系统的共性。根据所研究对象的不同,会出现形式不同的具体通信模型。对于数字通信系统其形式如图 1-2 所示。

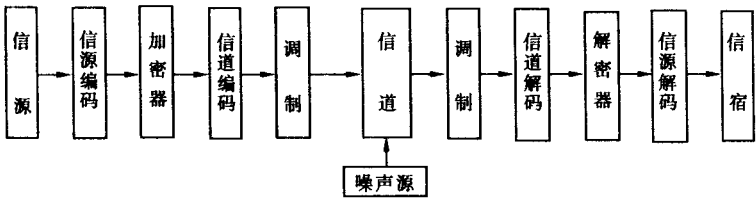


图 1-2 数字通信系统的组成

图 1-2 中,信源是将信息变换成原始电信号的设备或电路。常见的信源有产生模拟信号的电话机、送话、摄像机和输出数字信号的电子计算机等。

信源编码的任务是把模拟信号变换成数字信号,即模拟/数字变换(简称模/数变换或 A/D 变换)。若信源已经是数字信号,如数据信号,信源编码可省去。

加密器是对数字信号进行加密,对数字信号进行一些逻辑运算即可起到加密的作用。

信道编码包括纠错编码和线路编码(又称码型变换)两部分。经过信道编码的码流,码元之间具有较强的规律性,这样使其满足信道的要求,适应在信道上传输,接收端易于同步

接收发送端送来的数字码流，并且根据信道编码形成的规律性可自动进行检错甚至纠错。

编码器输出的信号是数字基带信号（即编码脉冲序列），若将基带信号直接送至信道中传输，这种方式称作基带传输。基带传输必须使用有线传输且距离有限，为了进行远距离传输需要借助高频振荡信号（载波），而调制技术就是完成这种变换的。这种利用调制技术来传输数字信号的方式称为频带传输。

接收端的解调、信道解码、解密器、信源解码等功能与发送端的调制、信道编码、加密器、信源编码等功能是一一对应的反变换，这里不再赘述。

需要指出的是，具体的数字通信系统并非一定包括图 1-2 所示的全部内容，如信源是数字信息时，则信源编码和信源解码可去掉，这时的通信系统称为数据通信系统；对于基带传输系统，调制、解调可去掉；当通信不需要保密时，加密器、解密器可去掉。如果对抗干扰性能要求不高，可以不要信道编码和信道解码部分。另外，同步系统是数字通信系统的重要组成部分，要求系统的收、发双方具有统一的时间标准，工作步调一致。同步包括载波同步、位（码元）同步和群（帧）同步等。如果同步存在误差或失去同步，将导致整个通信系统失效。

2. 数字通信的特点

与模拟通信比较，数字通信有以下特点。

(1) 抗干扰能力强，无噪声积累

信号在传输过程中必然会受到各种噪声的干扰。模拟通信中，为了实现远距离传输，提高通信质量，需在信号传输过程中及时对衰减的信号进行放大，同时叠加在信号上的噪声也被放大，如图 1-3 (a) 所示。由于在模拟通信中，噪声是直接干扰信号幅度，因此难以把信号和干扰噪声分开，随着传输距离的增加，噪声积累越来越大，通信质量越来越差。

在数字通信中，信息变换在脉冲的有无之中。为实现远距离传输，当信噪比恶化到一定程度时，可以在适当的中继距离采用再生的方法对已经失真的信号波形进行整形（如抽样判决），消除噪声的积累，如图 1-3 (b) 所示。

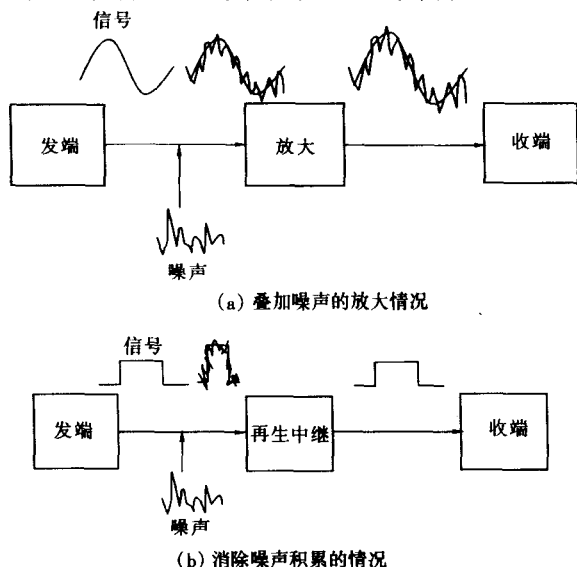


图 1-3 模拟和数字通信中噪声的形式

(2) 灵活性强，能适应各种业务要求

在数字通信中，各种消息（电报、电话、图像和数据等）都可以变换成统一的二进制数字信号进行传输。采用数字传输方式可以通过程控数字交换设备进行数字交换，组成统一的综合业务数字网（ISDN）。

(3) 便于与计算机连接

由于数字通信中的二进制数字与计算机所采用的信号完全一致，所以便于与计算机连接，形成复杂的远距离大规模自动控制系统和自动数据处理系统，实现以计算机为中心的自动交换通信网。

(4) 便于加密处理

信息传输的安全性和保密性越来越重要。数字通信的加密处理比模拟通信容易得多，经过一些简单的逻辑运算即可实现加密。

(5) 设备便于集成化、小型化

数字通信通常采用时分多路复用，不需体积大的滤波器。由于设备中大部分电路是数字电路，可用大规模和超大规模集成电路实现，因此，数字通信设备体积小、功耗低。

(6) 占用信道频带宽

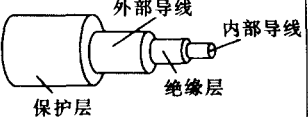
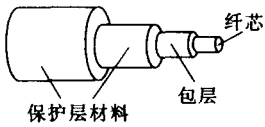
占用频带宽是数字通信的最大缺点。在电话交换系统中，一路模拟电话约占 4 kHz 带宽，而一路数字电话约占 64 kHz 带宽。随着宽频带信道（光缆、数字微波）的大量利用及数字信号处理技术（压缩编码与高效率调制方式）的发展，数字电话的带宽问题已不再是主要问题。

1.1.3 通信系统的分类

1. 按传输媒介可分为有线通信和无线通信

有线通信是指电磁波沿线缆传播的通信方式。线缆分为市话用双绞线、电缆、光缆等。他们的构造特征及主要用途如表 1-1 所示。

表 1-1 有线信道的线路种类、构造、特征和主要用途

线路种类	构造	特征	主要用途
双绞线		便宜、构造简单，传输频带宽，有漏话现象，容易混入杂音	电话用户线，低速 LAN
同轴电缆		价格稍高，传输频带宽，漏话感应少，分支、接头容易	CATV 分配电缆，高速 LAN
光纤		低损耗，频带宽，质量轻，直径小，无感应，无漏话	国际间主干线，国内城市间主干线高速 LAN

双绞线主要用于 100 kHz 以下或数字信号 100 Mbit/s 以下的信息传输，被广泛应用于电话端局、用户的连线，或低速局域网计算机之间的连接。

一般高频信号的传输或长距离传输大都使用同轴电缆，其频带要远远宽于双绞线并且其外部的金属能够避免杂音的混入，被广泛应用于百兆赫的模拟信号的传输，也用于 1 Gbit/s 的数字传输。由于电视频段在 91.25 ~ 900 MHz 范围，因此有线电视的分配电缆都采用同轴电缆。

光纤和以上两种介质相比有很大的优势，它具有低损耗、传输频带宽、无电磁感应、不漏话和质轻等特点。光缆已经逐渐取代双绞线和同轴电缆。

表 1-2 无线信道的工作频率、传播方式和主要用途

名 称	频 带 范 围	波 长 范 围	主要传播方式	主 要 用 途
长波	30 ~ 300 kHz	1 ~ 10 km	地表面波	远距离通信, 导航
中波	300 ~ 3 000 kHz	0.1 ~ 1 km	地表面波	调幅广播, 船舶、飞机通信
短波	3 ~ 30 MHz	10 ~ 100 m	地表面波, 电离层反射波	调幅广播, 调幅和单边带通信
超短波	30 ~ 300 MHz	1 ~ 10 m	直射波, 对 流层散射	调频广播, 广播电视, 雷达与导航, 移动通信
微波	> 300 MHz	< 1 m	直射波	广播电视, 卫星通信, 移动通信, 微波接力通信等

无线通信是电磁波在空间传播的通信方式, 传输媒介为空间, 电波是指频率在 3 GHz 以下的电磁波。电磁波包括电波、红外线、可见光、紫外线、X 射线和 γ 射线等。其中电波按所用波段不同又可划分为长波通信、中波通信、短波通信、超短波通信和微波通信等, 另外还有卫星通信、移动通信、无线寻呼等。

电波是由天线发射出去的, 天线的形状、尺寸决定了发射电波的频率。电波的传播方式也多种多样, 主要传播方式有地表面波、直射波和电离层反射波。无线信道的工作频率和传播方式以及主要用途如表 1-2 所示。

无线通信与有线通信比较, 具有机动灵活、不受地理环境限制、通信区域广等优点, 但易受到外界干扰, 保密性差。有线通信可靠性高, 成本低, 适用于近距离固定点之间的通信。在现代通信中, 无线通信系统和有线通信系统互相融合、互相补充。

2. 按信号传送类型可分为模拟通信和数字通信

利用模拟信号作为载体而传递信息的通信方式称为模拟通信。目前的电话通信和图像通信仍大量采用模拟通信方式。传输模拟信号的信道称为模拟信道。

利用数字信号作为载体而传递信息的通信方式称为数字通信。电报、计算机、数据等均属数字通信。

任一信息既可用模拟方式传输, 也可用数字方式传输。例如, 电话信号过去都用模拟信号传输, 而现在可以用数字化手段将模拟信号变成数字信号后再传输, 这就是数字电话。此外, 数字信号经变换后, 也可在模拟信道上传输。

1.1.4 通信系统的主要性能指标

设计和评价一个通信系统, 最重要的是它的有效性和可靠性(抗干扰性)。通信技术和通信理论的研究, 从一开始就紧紧围绕着解决这两个基本问题而进行着不懈的努力。

有效性, 是指要求通信系统怎样以最快速、最合理、最经济的方法来传输最大数量的消息。

可靠性, 是指接收信息的准确度。由于外界干扰的影响, 收到的与发出的消息并不完全相同。可靠性是一种量度, 用来表示接收消息与发送消息的符合程度。因此, 可靠性决定于系统抗干扰的性能, 即决定于通信系统的抗干扰性。

必须注意, 有效性和可靠性这两个要求通常是互相矛盾的。提高有效性会降低可靠性, 反之亦然。在实际处理时, 必须根据具体情况寻求适当的折中解决办法。

模拟通信系统和数字通信系统对有效性和可靠性这两个指标要求的具体内容有很大差别，现分别予以介绍。

1. 模拟通信系统的性能指标

模拟通信系统的有效性用有效传输频带来衡量。信道的传输频带越宽，则能够容纳的信息量就越大。例如，1路模拟电话占据4 kHz带宽，采用频分复用技术后，1对架空明线最多容纳12路模拟电话，而1对双绞线最多容纳120路，同轴电缆的通信量最多可达到1万路。显然同轴电缆的有效性指标是最好的。另外，模拟通信系统中，多路复用技术可提高系统的有效性。信道复用程度越高，信号传输的有效性就越好。

模拟系统的传输可靠性通常用整个通信系统的输出信噪比来衡量。在实际模拟通信中，造成发送信号与接收信号产生误差的原因有两个：一是信号在传输时叠加上噪声，称之为因加性干扰产生的误差；二是信道传输特性不理想，常称之为乘性干扰产生的误差。无论有无信号第一种干扰始终是存在的；第二种干扰则只有信号存在时才有。乘性干扰的影响，常常还用更具体的指标来表示，如电话系统有保真度、可懂度、清晰度等项质量指标。输出信噪比（即输出信号平均功率与噪声平均功率之比值）即表示因加性干扰产生的误差。本书主要研究加性干扰的影响。显然，信噪比越高，通信质量就越好。例如，一个好的电视系统应该有大约60 dB的信噪比，而一个商用的令人满意的电话系统应有约30 dB的信噪比。输出信噪比除与信号功率和噪声功率的大小有关外，还取决于调制方式。因此，改变调制方式可以改善通信系统的性能。

2. 数字通信系统的性能指标

与模拟通信系统相对应，在数字通信系统中，由于传输的是数字信号，因此，主要性能指标为传输速率和传输差错率。

传输速率有信号（码元）传输速率和信息传输速率之分；传输差错率有误码率和误比特率之分。为了说明以上概念，下面介绍码元和比特的概念。

码元是携带信息的数字单元，它是指在数字信道中传送数字信号的一个波形符号，它可能是二进制的，也可能是多进制的。

比特是信息的度量单位。1位二进制数所携带的信息量即为1比特（bit）。例如，10010110是8位二进制数字，所携带的信息量为8 bit。

（1）传输速率

传输速率是指在单位时间内通过信道的平均信息量，一般有两种表示方法，分别为比特速率和码元速率。

比特速率又称传信率，指系统每秒传送的比特数，用 f_b 表示，单位是bit/s；码元速率又称传码率，指系统每秒传送的码元数，用 f_B 表示，单位是波特（Baud）。码元速率并没有限定是何种进制的码元，所以给出码元速率时必须说明这个码元的进制。

对于M进制码元，其码元速率和比特速率的关系式为

$$f_b = f_B \cdot \lg M$$

① $\lg x = \log_2 x$ ，即 x 的以2为底的对数。

显然, 对二进制码元, $f_b = f_B$ 。

传输速率指标不能真正体现出信道的传输效率。因为传输速率越高, 所占用的信道频带越宽, 因此通常采用单位频带的传信率, 即 $\eta = \text{信息速度} / \text{频带宽度}$, 其单位为 $\text{bit} / (\text{s} \cdot \text{Hz})$ 。

(2) 传输差错率

衡量数字通信系统可靠性的主要指标是误码率和误比特率。

误码率指在传输的码元总数 N 中错误接收的码元数 n 所占的比例, 用 P_e 表示。可用公式表示为

$$P_e = \frac{\text{误码个数 } n}{\text{传输总码数 } N}$$

误比特率又称误信率, 指在传输的信息量总数中错误接收的比特数所占的比例, 用 P_{eb} 表示。在二进制情况下误码率和误比特率相同。差错率越小, 通信的可靠性越高。对 P_{eb} 的要求和所传输的信号有关, 如传输数字电话信号时, 要求 P_{eb} 在 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ 之间, 而传输计算机数据则要求 $P_{eb} < 10^{-9}$ 。当信道不能满足要求时, 必须加入纠错措施。

(3) 信噪比与误码率

在数字通信系统中, 其传输质量用误码率来表示。由于数字信号在传输过程中要受到外界噪声的干扰, 故在传输过程中会产生误码, 因此系统的误码率和信噪比必定存在一定的关系, 即信噪比越高, 误码率越低。

数学分析表明, 对于单极性码, 误码率与信噪比的关系为

$$P_e = \frac{1}{2} [1 - \text{erfc}(1/2\sqrt{r})]$$

对于双极性码, 误码率与信噪比的关系为

$$P_e = \frac{1}{2} [1 - \text{erfc}(\sqrt{r}/2)]$$

式中, P_e 为误码率; r 为二进制信号的功率信噪比; $\text{erfc}(y_0)$ 为余误差函数, $[\text{erfc}(y_0) = 1 - \text{erf}(y_0), \text{erf}(y_0) = 1/\sqrt{\pi} \int_0^{y_0} e^{-t^2} dt]$, 当 $y_0 \gg 1$ 时, $\text{erfc}(y_0) \approx \frac{e - y_0^2}{y_0 \sqrt{\pi}}$ 。

可见, 当误码率相同时, 接收双极性码比单极性码降低功率信噪比约 3 dB。这是因为在单极性码中直流分量虽然消耗功率, 但它并不传递信息, 而传递信息的交流幅度则和双极性码相同, 因而在功率信噪比相同的条件下, 双极性码比单极性码误码率要小。

对于双极性脉冲来说,

$$P_e = \frac{1}{2} \text{erfc} \sqrt{r}/2$$

对于脉冲编码调制 (PCM) 基带传输时的输出信噪比为

$$\frac{S_0}{N_0} = \frac{3 \times 2^{2k} K_{er}^2}{1 + 2^{2k+1} \text{erfc} \sqrt{r_1}/2} \quad (1-1)$$

式中, $K_{er} = (\text{信号幅度} / \text{平均功率})^{1/2}$; k 为编码信号的位数; r_1 为信道噪声叠加在 PCM 基带信号上的输入信噪比。

数字通信系统中, 不仅存在外部干扰噪声, 还存在内部的量化噪声。由式 (1-1) 可见, 当 r_1 增加时, 总的信噪比 (包括量化噪声和信道噪声在内的总影响) S_0/N_0 也增加, 但达到某个 r_1 值后, 继续压低信号噪声即继续增加 r_1 不能提高总的信噪比, 这时总的信噪

比是由量化噪声所决定,如果这时提高量化信噪比,则总的信噪比 S_0/N_0 会继续提高。这表示量化噪声压低后,信号噪声又起主要作用,结果是继续增加 r_1 又增加 S_0/N_0 。

1.2 信息与信号

1.2.1 信号与信息及其度量

通信就是信息的传递与交换。信息是指对收信者来说有意义的内容,是一个抽象的概念,它可以用不同形式的信号来表示,如语言、文字、数据、图像等。信号是信息的载体,是运载信息的工具。人们必须借助信号来传递和交换信息。在各种形式的信号中,光信号和电信号是用于信息传递的主要载体。电信号可以以电流的方式传输也可以以电磁波的方式传播,而光信号主要在光纤中进行传播,光纤通信被大量应用于通信系统中。

在日常生活中,往往把“信息”的概念和“数据”、“情报”、“资料”、“情况”、“知识”等概念混为一谈,当然也就谈不上定量的测度了。那么,信息论中,信息将如何进行度量呢?

科学技术上“信息”的概念,就是要把实际生活中原始的、含糊不清的概念加以提炼、概括、抽象和深化。如前所述,我们通常把文字、语言、数据、图像等都看成是“消息”的“集合”。这些消息集合具有一定的统计特性或概率特性。因而将“信息”定义为对消息的统计特性的一种定量描述。信息的意义是消息的不确定性,也就是用消息的不确定性来度量信息。具体地说,当人们得到消息之前,对它的内容有一种“不确定性”,信息就是对这种不确定性的定量描述。

当人们得到消息后,若事前认为消息中所描述事件发生的可能性越小,就认为这个消息带给他的信息量越大。可见,信息的量值必然与消息所代表事件的随机性,或事件发生的概率有关。从这点出发,信息论利用统计学概念对信息提出了一个度量方法,把度量信息量的物理量称为信息量,也称信息。

设消息所代表的事件出现的概率为 $p(x)$, 则该消息所含有的信息量

$$I = \log_a \frac{1}{p(x)}$$

式中,若对数底 $a = 2$, 则信息量的单位为比特 (bit); 若 $a = e$, 则单位为奈特 (nit), $1 \text{ nit} = \ln e \approx 1.443 \text{ bit}$; 若 $a = 10$, 则单位为哈特莱。

上述三种量度单位中应用最广泛的单位是比特 (bit)。它代表出现概率为 $1/2$ 的消息所含有的信息量。在通信系统中,当所传送的消息是两个等概率的消息之一时,任一消息所含有的信息量为 1 bit 。二进制数字通信系统中,经常遇到的就是这种情况。在实际场合,常把 1 位二进制数字称为 1 bit , 而不管这两个符号的出现概率是否相等。

除了上述单个消息所含有的信息量外,实际上信源(或消息源)总是由若干个可能发生的消息所组成。设有 n 个消息,其概率分别为 $p_1(x), p_2(x), \dots, p_n(x)$, 那么可以证明每